

# 넓은 덕트 단면내의 음원 분포 규명

## Identification of the Sectional Distribution of Sound Source in a Wide Duct

허용호, 이정권<sup>†</sup>

(Yong-Ho Heo and Jeong-Guon Ih<sup>†</sup>)

한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터  
(접수일자: 2013년 12월 12일; 채택일자: 2014년 1월 15일)

**초 록:** 덕트 내 음원 면에서의 음압과 입자 속도분포를 상세히 알 수 있다면, 주된 소음원들의 위치와 강도를 분석하여 전파특성을 잘 이해할 수 있고, 이에 따라 저소음화 설계에 유용한 정보로 활용가능하다. 이를 위한 기존의 방법들은 대개 단면상 위치와 무관한 일정 변수로 나타내는 제한점이 있다. 본 논문에서는 음원의 단면 분포를 높은 공간분해능으로 관찰할 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 모드 합성법을 기반으로 감쇠파의 영향과 근접장 측정을 포함하는 행렬식을 유도하였으며, 컴프레션 드라이버에 의해 일부 단면이 가진된 유동이 없는 덕트 시스템에서 검증하였다. 감쇠파 모드 개수의 증가에 따라 음압 스펙트럼을 더욱 정확하게 근사화 할 수 있었으며, 26개의 감쇠파 모드를 포함한 수렴 결과로부터 관심 헬름홀츠 수 영역에서 -25 dB 이하의 오차로 예측할 수 있었다. 수렴된 모드 진폭들을 이용하여  $kR = 1$ 에서 음원 면에서의 음원변수 분포를 관찰한 결과, 실제 음원이 설치된 국소 위치에서 높은 음압과 입자 속도 값을 분명히 나타내는 것을 보였다. 또한, 감쇠 모드의 역추산시에 정규화기법을 도입하여, 과결정된 반경방향 모드에 의해 발생된 무의미한 피크들을 효과적으로 제거할 수 있었다.

**핵심용어:** 덕트 내 음원, 근접장 측정, 감쇠파, 역문제, 공간 해상도

**ABSTRACT:** If one identifies the detailed distribution of pressure and axial velocity at a source plane, the position and strength of major noise sources can be known, and the propagation characteristics in axial direction can be well understood to be used for the low noise design. Conventional techniques are usually limited in considering the constant source characteristics specified on the whole source surface; then, the source activity cannot be known in detail. In this work, a method to estimate the pressure and velocity field distribution on the source surface with high spatial resolution is studied. The matrix formulation including the evanescent modes is given, and the nearfield measurement method is proposed. Validation experiment is conducted on a wide duct system, at which a part of the source plane is excited by an acoustic driver in the absence of airflow. Increasing the number of evanescent modes, the prediction of pressure spectrum becomes further precise, and it has less than -25 dB error with 26 converged evanescent modes within the Helmholtz number range of interest. By using the converged modal amplitudes, the source parameter distribution is restored, and the position of the driver is clearly identified at  $kR = 1$ . By applying the regularization technique to the restored result, the unphysical minor peaks at the source plane can be effectively suppressed with the filtering of the over-estimated pure radial modes.

**Keywords:** In-duct source, nearfield measurement, evanescent wave, inverse problem, spatial resolution

**PACS numbers:** 43.28 We.

### 1. 서 론

송풍기, 펌프, 터빈과 같은 유체기계들의 음원을

파악하는 과정은 주된 소음원의 위치를 파악하고 소음 발생 원리를 규명하는데 필수적이다. 파악된 정보를 바탕으로 음원의 설계 변수를 조정하거나 혹은 하류의 구조들을 수정하여, 방사된 소음을 줄이기 위한 방법들이 시도될 수 있다.

덕트 내의 음원을 알아내기 위한 방법들은 여러

<sup>†</sup>Corresponding author: Jeong-Guon Ih (J.G.Ih@kaist.ac.kr)  
Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Republic of Korea  
(Tel: 82-42-350-3035, Fax: 82-42-350-8220)

“이 논문은 2013년 한국음향학회 춘계학술대회에서 발표하였던 논문입니다.”

가지 난점들이 있다. 먼저, 공력음원의 특성상 적절한 기준신호를 측정하기가 어렵다. 이를 대체하기 위해 측정된 음압 신호를 기준신호로 사용하는 시도들이 있었다.<sup>[1]</sup> 두 번째로 유동으로 인해 발생된 소음과 유동 자체가 센서를 가진하는 효과로 인해 오염되지 않은 음압 신호의 측정이 어렵다.<sup>[2]</sup> 이를 위해, 덕트의 내부<sup>[3-6]</sup>와 외부<sup>[7,8]</sup>에서 여러 방법이 측정 방법들이 시도되었으며, 유동의 영향을 줄이기 위해 난류 소음 제거<sup>[9,10]</sup> 기법들이 시도되었다.

모드 합성법에 의해 측정된 음압 신호는 여러 모드의 합으로 근사가능하다. 측정된 음압 신호와 모드 진폭들과의 관계를 전달 행렬을 이용하여 모델링할 수 있으며, 향후에 역추산 과정을 통해 얻어진 모드 진폭들을 이용하여 음원의 정보를 파악한다. 전달 행렬을 모델링 하는 방법에는 크게 등가음원법(equivalent source method)와 모드 합성법(modal summation method)이 있다. 등가음원법을 이용한 시도들은, 단극음원<sup>[5]</sup> 혹은 이극음원<sup>[6]</sup>들이 음원면에서 분포해 있는 것으로 음원면을 모델링한다. 이때, 분포된 음원의 강도는 음원과 측정점의 위치를 고려하여 구성된 전달 행렬을 측정된 음압에 역으로 곱해주어 결정한다. 이 경우, 결정된 음원들의 강도는 등가 음원들의 분포 위치와 밀접한 관련이 있지만, 실제 등가 음원들의 위치는 선행적으로 알 수 없다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 많은 수의 등가음원들을 음원 면에 분포시키는 방법들이 시도 될 수 있으나, 분포되는 등가 음원들의 수 또한 음압을 측정하는 센서들의 수에 의해 제한되는 단점이 있다. 전달행렬을 모델링하는 다른 방법으로 모드 합성법이 있으며, 이는 덕트 내부에 존재하는 모드들의 합으로 덕트 내부에서 전파하는 음장을 모사한다. 이 경우에는, 모드 진폭들을 역으로 추산하며, 음원 변수들은 이로부터 예측될 수 있다. 이 방법은 축류 팬<sup>[11]</sup>과 스피커<sup>[4]</sup>의 음원을 파악하는데 적용되었다. 기존의 모드합성법을 이용한 음원 규명법은 전파 모드들만을 사용하여 낮은 헬름홀츠수에서 충분한 공간 분해능으로 음원을 관찰하는 것이 불가능한 단점이 있다.

본 논문에서는, 음원 변수들을 높은 공간 분해능으로 관찰하기 위해, 근접장 측정과 감쇠파를 포함

한 모드 합성법이 제안되었다. 제안된 방법은 감쇠 모드의 숫자들을 조정함으로써 공간 분해능을 조정할 수 있다. 제시된 방법의 검증을 위해, 컴프레션 드라이버를 이용하여 가진된 덕트 시스템에서 음원 규명이 시도되었다. 결과로부터 높은 공간 해상도로 음원을 규명할 수 있음을 확인하였다.

## II. 모드 진폭의 역추산

본 절에서 모든 수식은 시간 고조파의 파동, 등엔트로피 과정, 점성이 없는 균일한 매질, 유동이 관 내에 존재하지 않는 원형 덕트에 대해 유도되었다.

음원면에서 발생된 무한개의 모드는 주파수에 따라 전파 모드와 감쇠 모드로 나누어지게 된다. 발생된 모드가 전파되는지 혹은 감쇠되는지는 축 방향 파수  $k_{z,mm}$ 와 관련 있으며,

$$k_{z,mm} = \sqrt{k^2 - k_{r,mm}^2} \quad (1)$$

로 주어진다. 여기서,  $k$ 는 파수로 ( $k = \omega/c$ ) 정의되며,  $\omega$ 는 각 주파수,  $c$ 는 음파속도,  $k_{r,mm}$ 은 단면 방향 파수이다. 축 방향 파수  $k_{z,mm}$ 가 실수인 경우 전파 모드, 허수인 경우 감쇠 모드가 되며 이는 원주 모드 차수  $m$ 과 반경 모드 차수  $n$ 과 관련 있다.

음압 측정을 위해서는 단면측정이나 벽면측정 방법이 시도 될 수 있으나, 향후에 유동이 있는 공력음원들에의 적용성을 고려하여 본 연구에서는 벽면측정법에 한정하여 연구를 진행하였다.

### 2.1 전파 모드 진폭 추산

센서의 배치는 관심 헬름홀츠수와, 측정 평면 사이의 거리, 측정 평면에서의 마이크의 수, 음원면으로부터의 거리등을 고려하여 결정하여야 한다.

첫째, 측정 평면 사이의 거리는 관심 대상 주파수로부터 결정가능하다. 이론적으로, 두 측정 평면 사이의 거리가 파장의 절반이 되기까지의 모드 진폭들은 규명가능하다. 하지만, 실제로는 측정시의 오차로 인해 주파수 대역의 아래쪽 끝과 위쪽 끝에서 오차를 동반하는 결과를 얻기 쉽다. Abom과 Boden<sup>[11]</sup>에

의해 주파수 범위는

$$0.1\pi(1 - M^2) < kz_m < 0.8\pi(1 - M^2) \quad (2)$$

로 제안되며 여기서  $z_m$ 은 측정 평면 사이의 거리,  $M$ 은 마하수를 나타내며 유동이 없는 경우는  $M=0$ 이다.

둘째, 측정 평면에서 마이크로폰 수와 측정평면의 수는 가장 고차의 원주 모드 (circumferential mode)와 반경 모드 (radial mode)를 고려하여야 한다. 벽면 측정법을 사용하는 한 측정평면에서 벽면에 배치된 마이크의 수는 가장 고차의 원주 모드의 2배 이상이어야 하며, 측정 평면의 수는 가장 고차의 반경 모드에 1을 더한 수 이상이어야 한다. 입사파와 반사파를 고려해야 하는 경우 측정평면의 수는 이의 2배가 되어야 한다. 이외에도 부가적인 측정점들은 측정 오차의 영향을 줄이는데 도움이 된다.

셋째, 음원으로부터 측정평면까지의 거리를 고려하여야 한다. 원거리 음장의 경우에는  $L > 3D$ 가 제안되었다.<sup>[12]</sup> 이 때  $L$ 은 음원면에서 측정면까지의 거리이며,  $D$ 는 원형 덕트의 지름이다.

위의 조건들을 만족하는 센서 배치로부터 얻어진 음압을 이용하여 전파 모드의 진폭을 아래와 같이 계산 가능하다.

$$\begin{bmatrix} c_{p+} \\ c_{p-} \end{bmatrix} = [G_p^H G_p]^{-1} G_p^H p_f \quad (3)$$

여기서  $G_p = [M_{p+} T_{p+} \ M_{p-} T_{p-}]$ 는 원거리 음장과 전파 모드 사이의 전달 행렬이며,  $M$ 은 단면모드 행렬,  $T$ 는 축 방향 전파행렬, 아래첨자  $\pm$ 는 축 전파 방향, 아래첨자  $p$ 는 전파 모드, 윗첨자  $H$ 는 허미션 전치 (Hermitian transpose)를 의미한다.

### 2.2 감쇠 모드 진폭 추산

음원 규명 문제에 있어서는, 감쇠 모드의 경우 전파 모드와 달리 입사파의 모드들만 규명하면 된다. 감쇠 모드 진폭의 추산을 위해서는 2.1절의 요소들이 동일하게 고려되어야 한다. 특별히 고차항의 감쇠 모드들은 음원면으로부터 멀어지며 빠르게 감쇠

하기 때문에, 음원 면으로부터 측정 면까지의 거리를 결정할 때 주의가 필요하다.

근접장에서 측정된 음압은 전파 모드와 감쇠파 성분을 함께 가지고 있다. 식(3)을 통해 얻어진 전파 모드 진폭을 이용하여 근접장에서 전파 모드에 의한 음압을 재구성할 수 있고, 이를 근접장에서 측정된 음압에서 빼주면 감쇠 모드에 의한 음압 성분만을 추출할 수 있다. 감쇠 모드의 행렬식을 모델링하고 이의 의사 역행렬 (pseudo-inverse)을 남은 근접장 성분에 곱해주면, 아래와 같이 입사하는 감쇠 모드 진폭 벡터  $c_{e+}$ 를 계산할 수 있다.

$$c_{e+} = [G_e^H G_e]^{-1} G_e^H \left( p_n - G_p \begin{bmatrix} c_{p+} \\ c_{p-} \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

여기서  $G_e = [M_{e+} T_{e+}]$ 는 감쇠 모드에 의한 음압과 입사하는 감쇠 모드 진폭 사이의 전달행렬이며, 아래첨자  $e$ 는 감쇠 모드,  $p_n$ 는 근접장에서 측정된 음압 벡터이다.

전파 모드와 달리 감쇠 모드의 역추산 시에는 전체 시스템의 행렬이 나쁜 배치 문제 (ill-posed problem)가 되며, 해의 발산을 막고 물리적으로 의미있는 결과를 얻기 위해 정규화 방법을 사용하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 Tikhonov 정규화 방법을 적용하였으며, 그때의 감쇠 모드 규명 수식은 아래와 같다.

$$c_{e+} = [G_e^H G_e + \lambda I]^{-1} G_e^H \left( p_n - G_p \begin{bmatrix} c_{p+} \\ c_{p-} \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

여기서  $\lambda$ 는 정규화 변수이며, 본 연구에서는 GCV 함수를 이용하여 정규화 변수를 결정하였다. 음원 규명시에, 감쇠 모드의 규명에 의사 역행렬을 적용한 경우 식(4)와 Tikhonov 정규화와 GCV함수의 조합을 이용한 경우 식(5)를 이용한 결과를 다음 장에서 비교하였다.

## III. 덕트내의 음원규명

본 논문에서 제안된 근접장 측정과 감쇠 모드를 포함한 모드 합성법의 검증을 위해, 컴프레션 드라이버로 가진된 덕트 시스템에서 음압을 측정하고 이

를 이용하여 음원을 규명하였다. 본 논문에서는 유동은 없는 경우에 대해 실험을 진행하였다.

### 3.1 측정환경

실험 준비와 마이크로폰의 배치는 Fig. 1에 보였다. 음압측정은 공기 유동이 없는 경우에 대해 진행했다. 16개의 1/4 인치 어레이 마이크로폰 (B&K 4939)을 벽면 배치하여 음원 면으로부터 15, 30, 45, 60 mm 떨어진 거리에서 음압을 측정하였다. 음원으로는 컴프레션 드라이버 (Selenium D250-X)와 파워

앰프 (B&K 2716)를 사용하였으며 랜덤 신호를 전기 입력으로 사용하였다. 음원의 설치 위치는 Fig. 1에서 음원 면에서 동그라미로 나타나는 부분이다. 본 실험에서는, 컴프레션 드라이버의 출구단의 크기를 미리 알고 있으며, 이에 따라 공간 분해능을 선행적으로 결정할 수 있다. 감쇠 모드들의 경우 최대  $0 \leq k_{r,max}R < 9.5$ 인 경우의 모드들을 포함 할 수 있도록 하였으며, 이때 최대 감쇠 모드의 개수는 26개이다. 원거리 음장의 측정을 위해 2개의 1/2 인치 마이크로폰(B&K 4188)을 사용하였으며, 이때 마이크

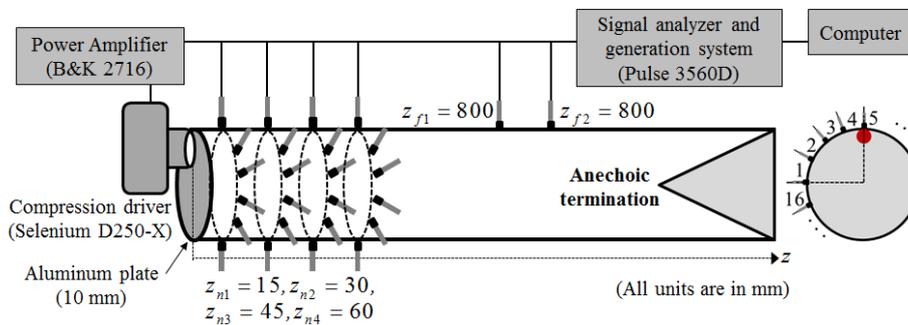


Fig. 1. Measurement setup. The numbers at the right sectional figure shows the positions of microphones, and the mark ● is the installation position of the driver.

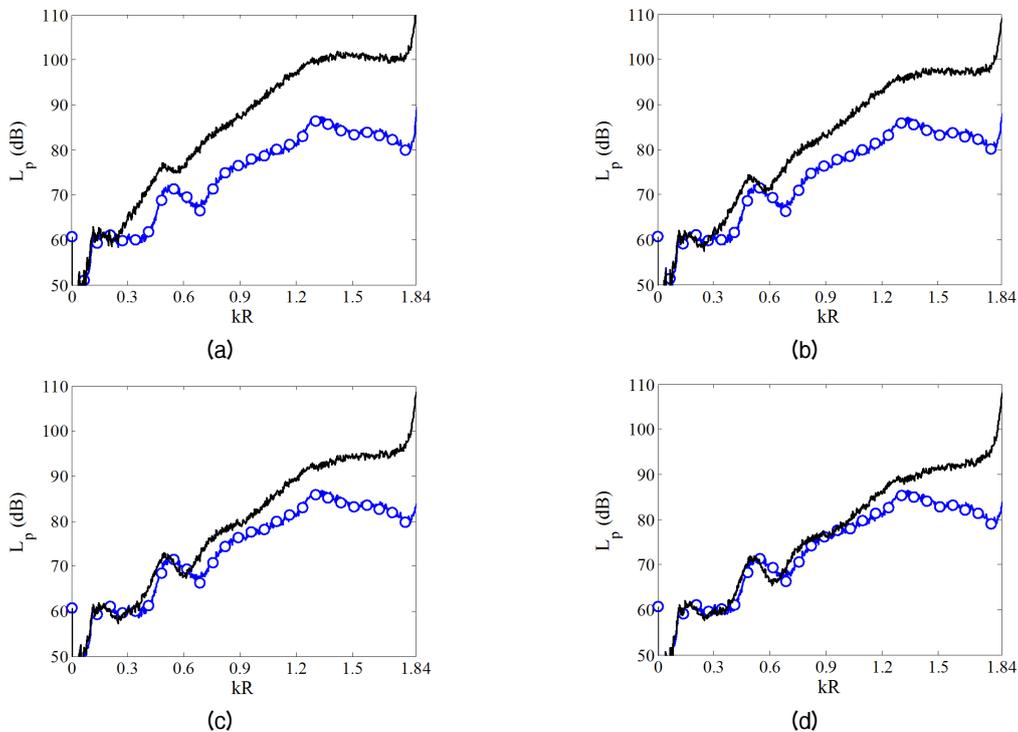


Fig. 2. Sound pressure spectra measured in the nearfield with the compression driver excitation : (a)  $z=15$  mm, (b)  $z=30$  mm, (c)  $z=45$  mm, (d)  $z=60$  mm; — microphone at point #5, —○— microphone at point #1.

로폰 사이의 간격은 160 mm 이다. 무향단의 성능과 덕트 내 첫 번째 원주 모드 발생하는 주파수를 고려하여, 실험 셋업은 헬름홀츠 수 범위  $0.57 < kR < 1.84$  에서 유의미한 결과를 얻을 수 있다. 신호 대 잡음비는 해당 헬름홀츠 수 범위에서 40 dB 이상으로 조정하였으며, 음압신호의 측정 및 처리를 위해서는 신호 분석기 (B&K Pulse 3560 D)를 이용하였다.

### 3.2 측정된 음압 스펙트럼

컴프레션 드라이버와 가장 가까이에 위치한 측정 평면 1의 마이크로폰 5번 위치에서 감쇠파의 영향이 가장 클 것으로 예상되며, 이를 1번 위치에서 측정된 음압 스펙트럼과 Fig. 2에서 비교하였다. 평면과 전파 영역인  $kR < 1.84$ 의 범위에서는, 측정평면이 1에서 4로 이동하면서 감쇠파의 영향이 줄며 두 스펙트럼이 수렴하는 경향을 관찰 가능하다.

### 3.3 재구성된 음압 스펙트럼

음원면으로부터 거리가 15 mm 떨어진 측정평면 1의 마이크로폰 5번에서의 음압을 재구성하였다. 이때 사용되는 감쇠파 모드의 개수를 증가시키며, 실제 측정된 음압과 Fig. 3에서 비교하였다. 이때, Tikhonov와 GCV함수를 이용한 정규화 방법이 적용되었다. 총 26개의 감쇠파 모드를 사용하였을 때 수렴된 결과를 얻었다.

근접장에서 재구성된 음압과 측정된 음압 스펙트

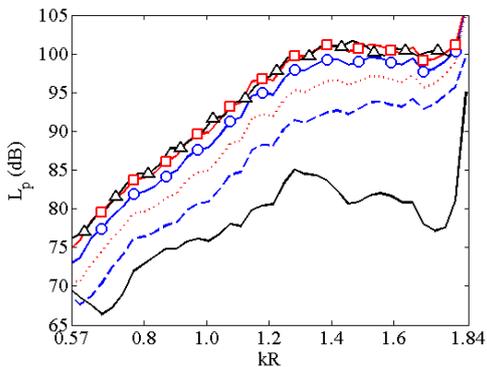


Fig. 3. A comparison of the measured and regenerated nearfield sound spectra at mic. point #5 in the measurement plane 1 with  $q$  modes: —  $q=2$ , - - -  $q=4$ , ····  $q=7$ , —○—  $q=20$ , —△—  $q=28$ ; —□— Measurement.

럼 사이의 오차를 아래와 같이 정의하였다.

$$e = 10 \log_{10} \left( \frac{|p_r - p_m|^2}{|p_m|^2} \right). \quad (6)$$

여기서,  $p_r$ 은 재구성된 음압,  $p_m$ 은 측정된 음압이다. 재구성시에 사용되는 감쇠파 모드의 개수를 증가시키며, 오차를 계산한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 26개의 감쇠 모드를 사용하는 경우, 본 논문에서 대상으로 하는 헬름홀츠 수 범위  $0.57 < kR < 1.84$ 에서 -25 dB 이하의 오차를 가지며 높은 정확도로 예측할 수 있음을 관찰하였다. 원거리 음장에서도 재구성한 결과를 측정 결과와 비교하였으며 두 스펙트럼이 일치함을 Fig. 5에서 관찰 가능하다. 결과로부터, 제안한 방법을 이용하여, 근접장과 원거리장에서 높은 정확도로 음압을 예측할 수 있음을 확인하였다.

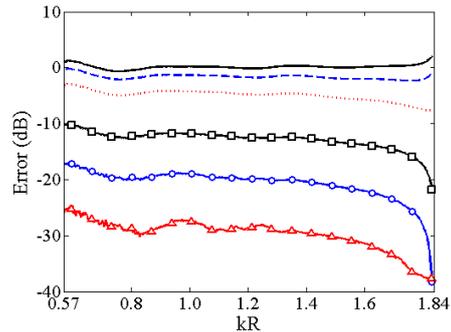


Fig. 4. Estimation error between the measured and restored nearfield pressure spectra with  $q$  number of modes: —□—  $q=2$ , - - -□—  $q=4$ , ····□—  $q=7$ , —□—  $q=13$ , —○—  $q=20$ , —△—  $q=28$ .

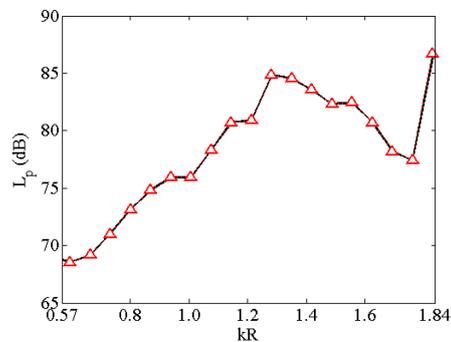


Fig. 5. A comparison of the measured and restored pressure level at farfield at  $z=800$  mm: — measurement, —△— regeneration.

### 3.4 음원 규명

역추산하여 얻은 모드 진폭들을 이용하여, 음원면에서의 입자 속도를 관찰하였다. 감쇠 모드의 역추산시에는 의사 역행렬을 이용한 방법과 Tikhonov 정규화 방법과 GCV함수를 적용하였으며, 각 방법에 의해 구성된 모드 진폭들을 음원 변수의 예측 과정에 사용하여 결과를 비교하였다. Fig. 6에서는 의사

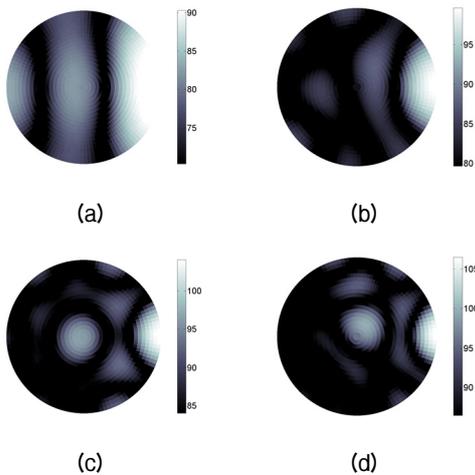


Fig. 6. Restored axial velocity field at the source plane with  $q$  number of modes at  $kR=1$ . The pseudo-inverse operation is used for the estimation of evanescent modal amplitudes: (a)  $q=6$ , (b)  $q=12$ , (c)  $q=19$ , (d)  $q=27$ .

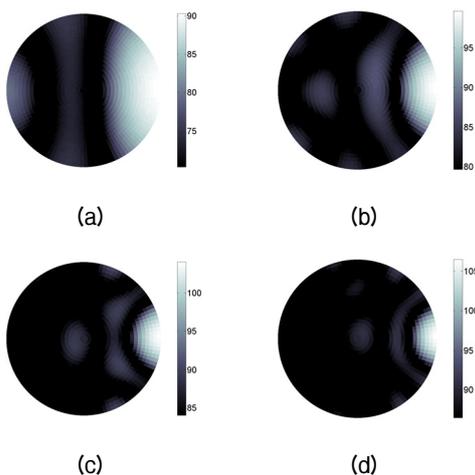


Fig. 7. Restored axial velocity field at the source plane with  $q$  number of modes at  $kR=1$ . Tikhonov regularization and GCV function is used for the estimation of evanescent modal amplitudes: (a)  $q=6$ , (b)  $q=12$ , (c)  $q=19$ , (d)  $q=27$ .

역행렬을 이용해 얻은 감쇠 모드 진폭들을 사용하여 입자 속도 분포를 규명하였으며, 입자속도 분포는  $20\log_{10}(v/v_{ref})$ 로 계산하여 로그 스케일로 표현하였다. 여기서  $v$ 는 재구성된 입자속도,  $v_{ref}=5e^{-8}m/s$ 이다. 감쇠 모드의 수를 증가시키며 컴프레션 드라이버의 위치를 더 높은 해상도로 규명할 수 있다. 그러나, 19개와 27개의 모드를 이용하여 음원을 규명한 경우 음원 면의 중심 부근에서 반경 모드 진폭의 과결정 (over-estimation)으로 인해 발생한 무의미한 피크가 존재한다.

Tikhonov 정규화 방법과 GCV 방법을 감쇠 모드 규명시에 사용한 결과를 음원 규명시에 이용하는 경우, 반경 모드 진폭의 과결정에 의해 발생한 오차를 효과적으로 제거할 수 있었다. 실제 음향 드라이버의 설치 위치에서 다른 음원면과 20 dB의 차이를 가짐을 Fig. 7에서 관찰가능하였으며, 음원 면의 일부가 가진 경우 주된 소음원의 위치를 명확하게 파악할 수 있음을 보였다.

## IV. 결 론

음원을 높은 해상도로 규명하여 음원 정보를 세부적으로 관찰하기 위해, 감쇠파와 근접장 측정을 사용하는 모드 합성법을 제안하였다. 음향드라이버로 일부분이 가진된 덕트 시스템에서 음압을 측정하고 이를 이용하여 전파 모드와 감쇠 모드의 진폭을 추산하였다. 얻어진 모드 진폭들을 이용하여, 음향드라이버로부터 가장 가까운 측정 점에서 음압을 재구성하였다. 재구성된 음압 스펙트럼과 측정된 음압 스펙트럼 사이의 오차는 평균적으로 -25 dB 이상의 높은 정확도를 가지는 것을 관찰하였다. 얻어진 모드 진폭을 이용하여 음원 면에서 입자 속도 분포를 관찰하였으며, 실제 음향드라이버가 위치된 곳에서 높은 값을 가지는 것을 확인하였다. 또, 이와 같이 재구성된 음원 변수 분포에 대해 정규화 방법을 적용하여, 음원면 중심에서 발생하는 무의미한 피크를 제거하였다. 향후 실제 유동이 있는 덕트 내에서 축류 팬의 음원 변수를 규명하는 연구를 수행할 계획이다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년 BK21과 한국연구 재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2012-0000977 and 2012R1A2A2A01009874).

## References

1. J. Lavrentjev and M. Abom, "Characterization of fluid machines as acoustic multi-port sources," J. Sound Vib. **197**, 1-16 (1996).
2. A.N. Kolmogorov, "The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers," reprinted in Proc. Roy. Soc. London, Ser. A Math. Phys. Sci. **434**, 9-13 (1991).
3. M. Abom, "Modal decomposition in ducts based on transfer function measurements between microphone pairs," J. Sound Vib. **135**, 95-114 (1989).
4. T. Bravo and C. Maury, "Enhancing the reconstruction of in-duct sound sources using a spectral decomposition method," J. Acoust. Soc. Am. **127**, 3538-3547 (2010).
5. Y. Kim and P. A. Nelson, "Estimation of acoustic source strength within a cylindrical duct by inverse methods," J. Sound Vib. **275**, 391-413 (2004).
6. C. R. Lewis and P. F. Joseph, "Determining the strength of rotating broadband sources in ducts by inverse methods," J. Sound Vib. **295**, 614-632 (2006).
7. F. O. Castres and P. F. Joseph, "Mode detection in turbofan inlets from near field sensor arrays," J. Acoust. Soc. Am. **121**, 796-807 (2007).
8. F. O. Castres and P. F. Joseph, "Experimental investigation of an inversion technique for the determination of broadband duct mode amplitudes by the use of near-field sensor arrays," J. Acoust. Soc. Am. **122**, 848-859 (2007).
9. M. Terao and H. Sekine, "In-duct pressure measurements to determine sound generation, characteristic reflection and transmission factors of an air moving device in flow," Proc. of Inter-Noise 1989, 143-146 (1989).
10. M. Abom, H. Boden, and J. Lavrentjev, "Source characterization of fans using acoustic 2-port models," Proc. of Fan noise 92, France, 359-364 (1992).
11. H. Boden and M. Abom, "Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts," J. Acoust. Soc. Am. **79**, 541-549 (1986).
12. ISO Standard 10534-2:1998(E), "Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method," International organization for standardization.

## 저자 약력

### ▶ 허 용 호 (Yong-Ho Heo)



2008년 8월: 한동대학교 기계공학과 (공학사)  
2010년 8월: KAIST 기계공학과 석사 (공학석사)  
2010년 9월 ~ 현재: KAIST 기계공학과 박사과정  
(관심분야) 덕트 음향, 공력 음향, 전기 음향

### ▶ 이 정 권 (Jeong-Guon Ih)



1979년 2월: 서울대학교 기계공학과 (공학사)  
1981년 2월: KAIST 기계공학과 (공학석사)  
1985년 2월: KAIST 기계공학과 (공학박사)  
1979년 7월 ~ 1990년 7월: 대우자동차근무  
1990년 8월 ~ 현재: KAIST 기계공학과 교수